

**Avaliação geotécnica de lodo de ETE e ETA
para reaproveitamento como cobertura final de
aterro sanitário**

Danilo Martins de Medeiros

Orientadora: Elivete Carmem Clemente Prim

2010/1



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

DANILO MARTINS DE MEDEIROS

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE LODO DE ETE E ETA PARA
REAPROVEITAMENTO COMO COBERTURA FINAL DE
ATERRO SANITÁRIO**

Florianópolis, (SC)

2010

DANILO MARTINS DE MEDEIROS

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE LODO DE ETE E ETA PARA
REAPROVEITAMENTO COMO COBERTURA FINAL DE
ATERRO SANITÁRIO**

**Trabalho apresentado à
Universidade Federal de Santa
Catarina para Conclusão do
Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e
Ambiental**

Florianópolis, (SC)

2010

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da
Universidade Federal de Santa Catarina

A ficha catalográfica é confeccionada pela Biblioteca
Central.

Tamanho: 7cm x 12 cm

Fonte: Times New Roman 9,5

Maiores informações em:

<http://www.bu.ufsc.br/design/Catalogacao.html>

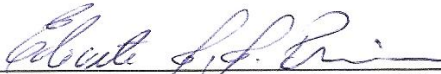
DANILO MARTINS DE MEDEIROS

**AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE LODO DE ETE E ETA PARA
REAPROVEITAMENTO COMO COBERTURA FINAL DE
ATERRO SANITÁRIO**

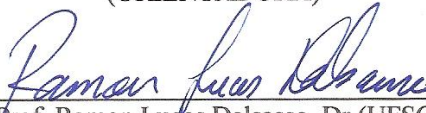
**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental – TCC II**

Florianópolis, 02 de julho de 2010.

Banca Examinadora:



Elivete Carmém Clemente Prim, M.Sc
(ORIENTADORA)



Prof. Ramon Lucas Dalsasso, Dr.(UFSC)



Rodrigo André Hummes, M.Sc (UFSC)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que sempre me apoiaram e contribuíram para a realização do curso.

A doutoranda e orientadora Elivete Carmen Clemente Prim que sempre me apoiou e orientou nos momentos de dificuldades e de dúvidas.

Ao professor Marciano Macarini por colaborar com a realização dos ensaios geotécnicos.

Ao laboratorista César por auxiliar na elaboração dos ensaios de mecânica dos solos.

Aos professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

A todos meus amigos.

RESUMO

Os lodos gerados nas estações de tratamento de água (ETA) e de esgotos (ETE) são classificados como resíduos sólidos e quando não dispostos adequadamente contribuem para a poluição do ambiente. Lodos são gerados em grandes volumes nos aglomerados urbanos que dispõe de sistemas de tratamento de esgotos e de água, desta maneira gerando a problemática da sua disposição final e tendo como consequência a saturação dos aterros sanitários e a poluição ambiental. Neste contexto, o presente trabalho objetivou avaliar o comportamento geotécnico do lodo ao se adicionar solo natural, com finalidade de reaproveitá-lo como material alternativo em cobertura final de aterro sanitário. O desenvolvimento do trabalho consistiu primeiramente na estabilização alcalina da mistura de partes iguais de lodo de ETE e de ETA (compondo 85% do total da mistura), mais 15% de alcalinizante (cal virgem) e posterior cura em estufa. Na segunda etapa realizou-se a mistura do lodo estabilizado com 10%, 30% e 50% de solo natural e realizados ensaios relacionados à mecânica dos solos a fim de determinar o comportamento geotécnico das misturas. Os ensaios foram realizados conforme as normas da ABNT para determinação dos índices físicos de solos. Os resultados geotécnicos das misturas solo-lodo foram comparados com as características geotécnicas de solos naturais utilizados em cobertura final de aterro sanitário.

PALAVRAS-CHAVES: resíduos sólidos, lodo de ETA, lodo de ETE, reaproveitamento, mecânica dos solos, cobertura de aterro sanitário.

ABSTRACT

The sludge generated on the water (WTS) and sewer (STS) treatment station are classified as solid waste and when not disposed properly it will contribute to environmental pollution. Sludge is generated in large volumes in urban areas that have water and sewer treatment stations, subsequently producing the problem with the final disposition, consequently the saturation of landfill sites and environmental pollution. The aim of this study was to note the geotechnical behavior of the sludge by adding to the natural soil, also with the purpose of reusing it as an alternative material in landfill final cover. The development work consisted primarily in the stabilization of alkaline mixing up equal parts of sludge WTS and STS (composing 75% of the total mixture), more than 15% of alkali (lime) and curing in an oven. In the second stage was to mix the sludge stabilized with 10%, 30% and 50% of natural land and performed tests related to soil mechanics to determine the geotechnical behavior of mixtures. The tests were performed according to ABNT standard for determination of physical indices of soil. The results of the geotechnical soil-sludge mixtures will be compared with geotechnical characteristics of soils used in landfill final cover.

KEY-WORDS: Solids waste, sludge of WTS, sludge of STS, reuse, soil mechanics, landfill cover.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Representação de Aterro Sanitário | 27 |
| Figura 2 - Exemplo de Sistema de Cobertura Final de Aterro Sanitário | 29 |
| Figura 3 - Sistema de Cobertura final de Aterro Sanitário | 29 |
| Figura 4 - Fluxograma da Metodologia. | 39 |
| Figura 5 - Bombonas de 60 L para Coleta de Lodo e Leitões de secagem de lodo da ETE e ETA..... | 40 |
| Figura 6 - Processo de mistura dos materiais, calagem, armazenagem e maturação..... | 41 |
| Figura 7 - Utensílios para Preparação das Amostras..... | 44 |
| Figura 8 - Preparação da Amostra de lodo Estabilizado (AE15) e do Solo Natural | 45 |
| Figura 9 - Ensaio Proctor Normal | 47 |
| Figura 10 - Curva de Compactação | 48 |
| Figura 11 - Curva Granulométrica. | 49 |
| Figura 12 - Ensaio de Limite de Liquidez..... | 50 |
| Figura 13 - Ensaio de Limite de Plasticidade..... | 51 |
| Figura 14 - Densidade dos Grãos..... | 52 |
| Figura 15 - Etapas do Ensaio de Permeabilidade..... | 53 |
| Figura 16 - Ensaio de Expansão CBR..... | 54 |
| Figura 17. Gráfico de Plasticidade..... | 57 |
| Figura 18 - Curvas Proctor Normal | 60 |
| Figura 19 - Curvas Granulométricas | 63 |
| Figura 20 - Permeabilidade AE15+10% SOLO | 66 |
| Figura 21 - Permeabilidade AE15+30% SOLO..... | 66 |
| Figura 22 - Permeabilidade AE15+50% SOLO..... | 67 |
| Figura 23 - Expansão | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição Química Típica do Lodo Bruto e Digerido | 22 |
| Tabela 2 - Características dos Lodos de Estações de Tratamento de Água | 23 |
| Tabela 3 - Dados da disposição final dos RSU coletados no Brasil | 24 |
| Tabela 4 - Ensaio de Mecânica dos Solos e Respektivas Normas | 42 |
| Tabela 5 - Descrição dos Materiais | 43 |
| Tabela 6 - Ensaio Geotécnico e Respectiva Abertura da Malha das Peneiras .. | 44 |
| Tabela 7 - Resumo do Sistema Unificado de Classificação..... | 56 |
| Tabela 8 - Resultados dos ensaios de compactação e índice de vazios..... | 61 |
| Tabela 9 - Resultados Granulométricos | 63 |
| Tabela 10 - Índice de Plasticidade | 64 |
| Tabela 11 - Densidade Real dos Grãos | 65 |
| Tabela 12 - Expansão das amostras | 68 |
| Tabela 13 - Quadro Geral de Resultados | 70 |
| Tabela 14 - Características das camadas e amostras..... | 71 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas

CaO – Cal Virgem

CH – Argilas de alta plasticidade

CL – Argilas de plasticidade média. Pode ser também argila arenosa ou siltosa.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

ETA - Estação de Tratamento de Água.

ETE - Estação de Tratamentos de Esgotos

IP – Índice de Plasticidade

LETA – Lodo de Estação de Tratamento de Água

LETE – Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MH – Siltes inorgânicos, solos siltosos

ML – Siltes e areias finas com pouca plasticidade; areia fina argilosa ou siltosa

OL – Siltes orgânicos ou argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade

RCD – Resíduos da Construção e Demolição

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SAE - Sistemas de Água e Esgotos de Jurerê Internacional

SC – Santa Catarina

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 A geração de Lodos de ETE e ETA | 15 |
| 1.2 Origem da Pesquisa | 16 |
| 1.3 Objetivos..... | 17 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 17 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 1.4 Finalidades..... | 17 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1. Resíduos Sólidos..... | 19 |
| 2.1.1. Classificação dos Resíduos Sólidos | 19 |
| 2.1.1.1. Classificação dos Lodos | 20 |
| 2.1.2. Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos | 20 |
| 2.1.3 Lodo de Estações de Tratamento de Água | 22 |
| 2.1.4. Disposição Final dos lodos | 23 |
| 2.2 Estabilização e Solidificação | 25 |
| 2.3 Coberturas de aterro Sanitário | 26 |
| 2.4 Sistemas de Cobertura Final de Aterros Sanitários | 27 |
| 2.4.1. Camada Superficial..... | 29 |
| 2.4.2. Camada de Proteção..... | 30 |
| 2.4.3. Camada de Drenagem | 31 |
| 2.4.4. Camada de Barreira Hidráulica/gás | 32 |
| 2.4.5. Camada Coletora de Gás..... | 32 |
| 2.4.6. Camada de Base..... | 33 |
| 2.5 Solos Naturais como Cobertura de Aterros Sanitários | 33 |
| 2.6 Reaproveitamento de Resíduos como Cobertura de Aterro Sanitário..... | 36 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1 Origem e Coleta dos Lodos e do Solo Natural..... | 39 |
| 3.1.1 Lodo de LETE e LETA | 39 |
| 3.1.2 Solo Natural..... | 40 |
| 3.2 Estabilização Alcalina..... | 40 |
| 3.3 Caracterização Geotécnica..... | 42 |
| 3.3.1 Preparação das Amostras | 43 |

| | |
|---|----|
| 3.3.2. Preparação das Amostras de solo-lodo | 45 |
| 3.3.3 Teor de Umidade | 45 |
| 3.3.4 Ensaio Proctor Normal | 46 |
| 3.3.5 Granulometria | 48 |
| 3.3.6 Limite de Liquidez..... | 49 |
| 3.3.7 Limite de Plasticidade | 50 |
| 3.3.8 Massa Específica dos Grãos | 51 |
| 3.3.9 Permeabilidade | 52 |
| 3.3.10 Expansão | 53 |
| 3.4 Sistema Unificado de Classificação..... | 55 |
| 3.4.1 Solos Grossos | 55 |
| 3.4.2 Solos Finos | 55 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 58 |
| 4.1 Introdução..... | 58 |
| 4.2 Ensaio Proctor Normal | 59 |
| 4.3 Granulometria..... | 61 |
| 4.4 Índice de Plasticidade | 64 |
| 4.5 Massa Específica dos Grãos | 64 |
| 4.6 Permeabilidade | 65 |
| 4.7 Expansão | 68 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 74 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 A geração de Lodos de ETE e ETA

A sociedade atual tem se preocupado com o equacionamento de grandes questões ambientais. Duas questões de caráter mundial, contempladas na agenda 21, e cujos resultados implicam na qualidade de vida dos seres humanos são: a disposição final de resíduos e a melhoria das condições ambientais do planeta.

O crescimento populacional desordenado, associado ao estilo de desenvolvimento baseado no consumo, determina pressões crescentes sobre o meio ambiente e os recursos naturais. Os perigos deste desenvolvimento estão relacionados aos danos ocasionados pela extração, processamento de matérias-primas e, principalmente, à geração e destino final de resíduos produzidos (BETTIOL, 2000).

A preocupação com o destino final dos resíduos produzidos em ETA e ETE cresce a cada dia. Eles exigem alternativas de destinação final seguras em termos de saúde pública e ambientalmente aceitáveis, principalmente o lodo de ETE por apresentar organismos patogênicos na sua composição. O lodo gerado nas ETA's apresenta muitas vezes altas concentrações de metais, principalmente quando o sulfato de alumínio for utilizado como coagulante. Segundo Andreoli *et al.* (2001), a disposição final dos lodos trata-se de uma atividade de grande complexidade e alto custo, que, se for mal executada, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários esperados dos sistemas de tratamento de água e esgoto. A disposição não controlada de tais resíduos causa contaminação das águas subterrâneas e do solo. Além disso, o espaço disponível para a disposição de resíduos em aterros

sanitários e industriais é cada vez mais limitado, principalmente em regiões densamente habitadas.

Desta forma, pode-se dizer que é evidente a necessidade de pesquisas relacionadas ao destino final destes resíduos. Portanto, pretende-se neste TCC contribuir com os estudos relacionados a essa área de pesquisa.

1.2 Origem da Pesquisa

Atualmente vem sendo desenvolvida na UFSC, especificamente no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental, pela doutoranda Elivete C.C. Prim, a pesquisa intitulada “Reaproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Esgoto como Material de Cobertura de Aterro Sanitário: Aspectos Ambientais, Técnicos e Econômicos” (PRIM, 2005). Essa pesquisa tem orientação do Professor Armando Borges de Castilhos Jr. e em seu desenvolvimento contou com apoio do autor do presente trabalho, entre outros bolsistas de iniciação científica. Neste trabalho já foram realizadas pesquisas sobre as características dos lodos, seu comportamento após tratamento alcalino com diversos percentuais de mistura dos resíduos, lodos de ETE e ETA com cal virgem e cal hidratada, e simulação de avaliação econômica. Com os resultados obtidos até o momento, pode-se dizer que o processo possui comprovada sua viabilidade ambiental (PRIM, 2006), concluindo-se que entre as misturas avaliadas, a mistura com adição de 15% de cal e 42,5% de LETE e 42,5% de LETA (AE15) atende as necessidades para uso em aterro sanitário, assim como a avaliação econômica do AE15 mais 50% de solo natural, também apresenta excelentes vantagens econômicas em substituição do solo argiloso usado

tradicionalmente em aterros sanitários brasileiros (PRIM, 2006). Com o intuito de apoiar a pesquisa na etapa de avaliação técnica, construiu-se o presente trabalho de conclusão de curso conjuntamente e sob orientação da doutoranda aqui citada.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar através de ensaios de mecânica dos solos a possibilidade de uso do subproduto da estabilização alcalina de lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto e de água como cobertura final de aterro sanitário.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características geotécnicas de uma amostra de lodo de ETE e ETA estabilizada com 15% de CaO;
- Avaliar o comportamento geotécnico ao se misturar a mesma amostra com diferentes percentuais de solo natural;
- Comparar os resultados com o que diz a bibliografia sobre características geotécnicas de solos de cobertura final de aterro.

1.4 Finalidades

- Contribuir com estudos para o destino ambientalmente correto dos lodos gerados em estações de tratamento de esgotos e estações de tratamento de água.

- Contribuir com estudos para redução do uso de recursos naturais como é o caso dos solos extraídos de jazidas naturais para fins de cobertura em aterros sanitários.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resíduos Sólidos

Segundo a norma brasileira NBR 10004, de 1987 – Resíduos sólidos – classificação, resíduos sólidos são:

“aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face a melhor tecnologia disponível”.

2.1.1. Classificação dos Resíduos Sólidos

De acordo com a NBR-10004 da ABNT, os resíduos sólidos são classificados em:

Classe I - Perigosos: são aqueles que apresentam riscos ao meio ambiente e exigem tratamento e disposição especiais, ou que apresentam riscos à saúde pública. As principais características desses resíduos são: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.

Classe II – Não Perigosos:

Classe II A – Não inertes. São Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes

podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Classe II B - Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

2.1.1.1. Classificação dos Lodos

Segundo a Resolução 03/2006 do CONAMA, a classificação do lodo de esgoto se baseia nos seguintes aspectos:

- Presença e concentração de agentes patogênicos para humanos e outros animais;
- Presença e concentração de substâncias potencialmente tóxicas;
- Estabilidade do lodo de esgoto;
- Atratividade de vetores;

2.1.2. Lodo de Estações de Tratamento de Esgotos

O lodo de esgoto é o principal resíduo do processo de tratamento de águas residuárias. A produção desse resíduo está aumentando, devido à crescente urbanização e aumento populacional (Andreoli et al., 1997; Andreoli et al., 1998; EPA, 1999; Berton, 2000). Os custos de disposição final do lodo de esgoto são altos, e podem

chegar a 60% dos custos operacionais de uma ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) (Rogalla, 1998; Andrade & Mattiazzo, 2000; Berton & Camargo, 2000).

Os principais riscos associados ao lodo referem-se à questão dos metais pesados, aspectos sanitários, micropoluentes orgânicos e nitrogênio. Tanto os metais quanto os agentes patogênicos, como ovos de helmintos, esporos de fungos e colônias de bactérias, tendem a co-precipitar com o esgoto e se concentrar no lodo (PROSAB, 1999). A Tabela 1 representa a composição típica do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto.

Os lodos gerados pelos processos físicos e biológicos das estações de tratamento de esgoto apresentam algumas características indesejáveis que dificultam sua manipulação e processamento (ANDREOLI et al., 1999b). Estas características são:

- Odor desagradável;
- Presença de microrganismos patogênicos;
- Elementos tóxicos de origem orgânica ou mineral;
- Dificuldade de desidratação.

Tabela 1 - Composição Química Típica do Lodo Bruto e Digerido

| Item | Lodo Bruto | | Lodo Digerido | |
|-----------------------------------|------------|----------------|---------------|----------------|
| | Variação | Característica | Variação | Característica |
| Sólidos Totais % | 2 – 7 | 4 | 6 – 12 | 10 |
| Sólidos Voláteis % de ST | 60 – 80 | 65 | 30 – 60 | 40 |
| Graxas e gorduras solúveis (%) ST | 6 – 30 | – | 5-20 | – |
| Proteínas (%) do ST | 23 – 30 | 25 | 15 – 20 | 18 |
| Nitrogênio (%) do ST | 1,5 – 4 | 2,5 | 1,6 – 6,0 | 3 |
| Fósforo P_2O_5 % do ST | 0,8 – 2,8 | 1,6 | 1,5 – 4,0 | 2,5 |
| Potássio K_2O % do ST | 0 – 1,0 | 0,4 | 0 – 3,0 | 1,0 |
| Celulose % do ST | 8 – 15 | 10 | 8 – 15 | 10 |
| Ferro | 2 – 4 | 2,5 | 3 – 8 | 4 |
| Sílica (SiO_2 % do ST) | 15 – 20 | – | 10 – 20 | – |
| Ph | 5 – 8 | 6 | 6,5 – 7,5 | 7 |
| Alcalinidade mg/L $CaCO_3$ | 500 – 1500 | 600 | 2500 – 3500 | 3000 |
| Ac. Orgânico mg/L H Ac | 200 – 2000 | 500 | 100 – 600 | 200 |

Fonte: METCALF; EDDY, 1972 (citados por ANDREOLI, 1999 a).

2.1.3 Lodo de Estações de Tratamento de Água

O lodo gerado nas ETAs pode ter suas características bastante variadas, dependendo fundamentalmente das condições apresentadas da água bruta, dosagens e produtos químicos utilizados, forma de limpeza dos decantados, entre outros fatores (PROSAB, 1999).

O lodo de ETA tem sua origem, na maioria das vezes, nos decantadores e representa de 0,3 a 1,0% do volume de água tratada. Contém materiais inertes, matéria orgânica e precipitados químicos, como sulfato de alumínio ou de ferro que são utilizados como coagulante. A Tabela 2 representa a composição típica de lodos provenientes de estação de tratamento de água.

Tabela 2 - Características dos Lodos de Estações de Tratamento de Água

| Parâmetros | Média | Variação |
|---|--------------|-----------------|
| Alumínio (porcentagem em peso seco) | 21,2 | 2,8 – 30 |
| Cálcio (porcentagem em peso seco) | 2,7 | 0,3 – 5,0 |
| Ferro (porcentagem em peso seco) | 3,2 | 1,2 – 6,6 |
| Potássio (porcentagem em peso seco) | 1,7 | 0,04 – 5,0 |
| Magnésio (porcentagem em peso seco) | 0,45 | 0,24 – 8,0 |
| Silício (porcentagem em peso seco) | 20 | - |
| Fósforo (porcentagem em peso seco) | 0,35 | - |
| pH | 7,0 | 5,1 – 8,0 |
| Carbono Orgânico Total (porcentagem em peso seco) | 3,1 | 0,85 – 6,5 |
| DBO ₅ (mg/L) | 45 | 2 – 104 |
| DQO (mg/L) | 500 | 100 – 10000 |
| Nitrogênio Total Kjeldahl (porcentagem em peso seco) | 0,68 | 0,44 – 1,0 |
| Equivalência em carbonato de cálcio (porcentagem) | 15 | 10 – 20 |
| Coliformes (número/g) | < 20 | - |

Fonte: Elliott & Dempsey in caput Richter (2001)

2.1.4. Disposição Final dos lodos

Um dos grandes problemas enfrentados hoje é sobre a questão da destinação dos resíduos sólidos, visto que, quando descartados

inadequadamente no ambiente, são responsáveis por alterações no solo, na água e no ar, além de possíveis danos a diversas formas de vida (COSTA, 2004).

Dados levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002) mostram que a disposição de resíduos na forma de lançamento a céu aberto representa a modalidade mais utilizada na maioria dos municípios com população inferior a 10 mil habitantes, ou seja, cerca de 50 % dos municípios brasileiros.

Conforme a Tabela 3 estima-se que apenas 39 % dos municípios brasileiros fornecem destino e tratamento adequado aos RSU. Este problema torna-se mais acentuado quando é analisada a grande quantidade de municípios situados nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste que destinam os resíduos de maneira inadequada. Nas demais regiões, embora ainda exista uma quantidade expressiva de municípios onde a destinação final de RSU é inadequada, a maioria desses municípios já possui aterros controlados, o que indiretamente representa uma melhor conscientização do problema (ABRELPE, 2007)

Tabela 3 - Dados da disposição final dos RSU coletados no Brasil

| Região | Municípios com destinação adequada | Municípios sem destinação adequada | Destinação adequada (%) |
|--------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| Norte | 67 | 382 | 14,8 |
| Nordeste | 448 | 1345 | 25,0 |
| Centro-Oeste | 163 | 303 | 35,0 |
| Sudeste | 789 | 879 | 47,3 |
| Sul | 691 | 497 | 58,1 |
| Brasil | 2158 | 3406 | 38,6 |

Fonte: ABRELPE-2007

A definição do destino final para lodo de uma ETA é uma das tarefas mais difíceis para o administrador do serviço de água, envolvendo custos elevadíssimos e restrições do meio ambiente. Entre as alternativas atualmente utilizadas, podem-se incluir:

- Lançamentos em cursos d'água;
- Lançamento ao mar;
- Lançamento na rede de esgoto sanitário;
- Lagoas;
- Aplicação ao solo;
- Aterro sanitário;

Existem varias alternativas tecnicamente aceitáveis para o tratamento e disposição final do lodo de esgoto. Entre elas pode-se destacar a disposição oceânica, emissários submarinos, aterros sanitários, lanfarming, incineração, reciclagem agrícola, recuperação de áreas degradadas (Andréia C. Ferreira; Cleverson V. Andreoli; Décio Jurgense).

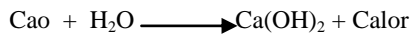
2.2 Estabilização e Solidificação

A solidificação é um processo que envolve a adição de material, que gera uma massa sólida do resíduo tratado, melhorando sua integridade estrutural e suas características físicas. A solidificação encapsula o contaminante formando um composto sólido, restringindo sua migração.

A estabilização consiste em um estágio de pré-tratamento através do qual os constituintes perigosos de um resíduo são

transformados e mantidos nas suas formas menos solúveis ou menos tóxicas. Tais transformações se dão por meio de reações químicas que fixam elementos ou compostos tóxicos em polímeros impermeáveis ou em cristais estáveis. Quanto às características físicas do resíduo, estas podem ou não ser alteradas e melhoradas.

O Processo de estabilização alcalina consiste na adição de uma base, normalmente a cal ao lodo, em proporções que variam de 30 a 50% do peso seco do lodo, até atingir pH 12 ou superior, cujo efeito é a destruição de microorganismos patogênicos, diminuição do odor e a fixação de metais pesados (ANDREOLI, 2001). O processo de calcinação segue a reação química a baixo:



Neste processo três fatores intervêm no processo de desinfecção: inicialmente a alteração da temperatura, a mudança do pH, da massa resultante e, finalmente, a ação da amônia que será formada a partir do nitrogênio do lodo em condições de temperatura e pH elevados (ANDREOLI et al., 2001). Algumas características físicas e químicas do lodo são alteradas pela adição de cal. Fisicamente, o lodo pode formar uma capa mais dura e branca ao ser exposto ao ar livre. Quimicamente, além da fixação dos metais pesados, pode haver insolubilização do fósforo e perda de nitrogênio pela volatilização da amônia. (ANDREOLI, 2001).

2.3 Coberturas de aterro Sanitário

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1993) o aterro sanitário é definido como um

processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção ao meio ambiente. A Figura 1 representa um esquema de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos.

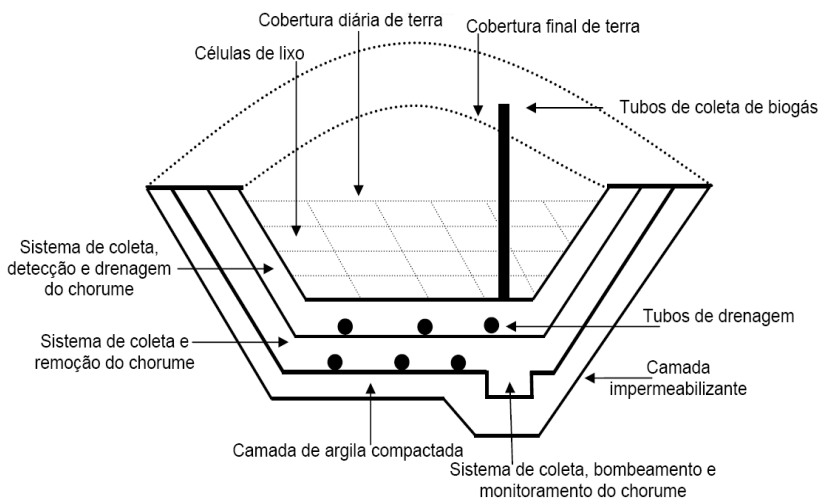


Figura 1 - Representação de Aterro Sanitário
 Fonte: SWITZENBAUM -1992.

2.4 Sistemas de Cobertura Final de Aterros Sanitários

O sistema de cobertura final dos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos faz parte do plano de encerramento das atividades do aterro sanitário e deve ser projetado e implantado de modo a garantir a estabilidade física, química e biológica da área, até que o local se

encontre em condições de ser preparado para a sua utilização futura (KOERNER & DANIEL, 1997; IPT, 2000).

Um sistema de cobertura final de aterro de resíduos sólidos urbanos tem como objetivo evitar a proliferação de vetores, a infiltração de líquidos, o escape de gases para a atmosfera e reduzir fenômenos erosivos, bem como reintegrar ambientalmente a área do aterro. A camada de recobrimento deve apresentar certa resistência às condições climáticas, capacidade para absorver recalques acentuados, trincas, rupturas e rastejos, capacidade de suporte de sobrecargas oriundas de tráfego de veículos durante as operações de encerramento do aterro e resistência a ataques químicos causado por gases, plantas e resíduos (KOERNER & DANIEL, 1997).

A cobertura final de aterro sanitário pode ser composta por uma série de camadas, com propriedades físicas e finalidades diferentes. A

Figura 2 e Figura 3 representam um sistema adequado de cobertura final de aterro sanitário. . A diferença entre as figuras é que, na figura 2 são usados matérias geossintéticos. Conforme figura as camadas seguem a seguinte ordem:

- 1ª Camada de fundação (foundation) - acima dos resíduos;
- 2ª Camada coletora de gás com um filtro geotêxtil;
- 3ª Camada barreira de argila compactada com uma barreira de um geossintético chamada de geomembrana;
- 4ª Camada de drenagem lateral com filtro geotêxtil;
- 5ª Camada de topo ou de suporte a vegetação;

Nem todas as camadas são necessárias em todos os tipos de sistema de cobertura final, por exemplo, a camada de drenagem que não é necessária em sistemas de cobertura final de regiões áridas.

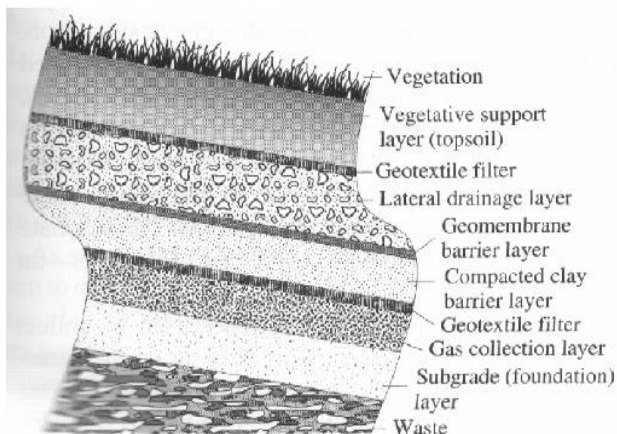


Figura 2 - Exemplo de Sistema de Cobertura Final de Aterro Sanitário
Fonte: COSTA, 2006

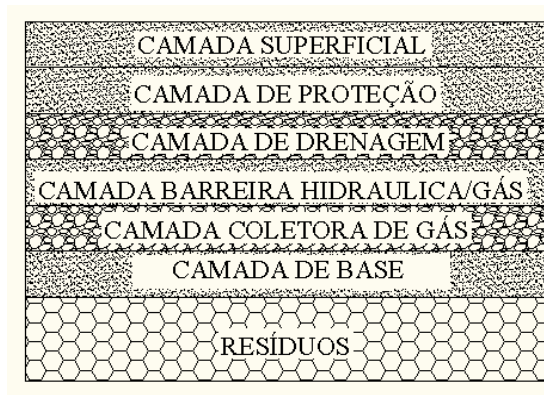


Figura 3 - Sistema de Cobertura final de Aterro Sanitário

2.4.1 Camada Superficial

Dentre as camadas de um sistema típico de cobertura final de aterro de resíduos sólidos, a camada superficial é uma das mais importantes, pois é a camada que forma, protege e dá sustentabilidade à vegetação (Gill et al., 1999). A função básica desta camada é separar os

componentes que se encontram abaixo da mesma. Esta é constituída por uma camada de solo revestida por vegetação, que serve para proteger o sistema de cobertura final da ação de intempéries, minimizando os processos erosivos.

O material mais comumente utilizado na camada superficial é o solo fertilizado, com composição física e química adequada ao desenvolvimento de vegetação. Quanto à qualidade química, os fatores mais importantes são o pH, CTC e alguns macro nutrientes como N, P e K (MAGALHÃES, 2005).

Já quanto à qualidade física devem ser evitados os materiais muito grosseiros, pois retêm pouca umidade durante o período de seca e comprometem a sustentabilidade de água por parte da vegetação (MAGALHÃES, 2005).

2.4.2 Camada de Proteção

Normalmente não há uma distinção entre as camadas superficial e de proteção, como representado na

Figura 2. A camada de proteção se localiza abaixo da camada superficial e é utilizada para armazenar a água que percola através da camada superfície e para proteger as camadas localizadas abaixo. Esta camada deve ser espessa, de modo a prever certa retenção de água, evitar erosões em sulcos, acomodar o sistema de raízes de plantas e impedir a invasão de animais.

A utilização de materiais alternativos a esta camada não devem possuir textura muito fina, comum de solos argilosos, pois poderá dificultar o estabelecimento das plantas pela retenção do excesso de água na superfície. Materiais muito arenosos podem facilitar a

percolação de água e aumentar a lixiviação de nutrientes, dificultando o desenvolvimento de plantas. O que se busca para esta camada é utilizar um material com características geotécnicas que atue no equilíbrio entre a percolação de água e lixiviação de nutrientes.

Para esta camada deve-se evitar a utilização de materiais expansivos e suscetíveis à grandes contrações, o que pode provocar trincas no sistema de camadas (KOERNER & DANIEL, 1997).

2.4.3 Camada de Drenagem

A camada de drenagem está localizada entre a camada de proteção e a camada de barreira. Esta camada tem a função de drenar constantemente a camada de proteção e reduzir as poro-pressões das camadas de barreira, contribuindo para a estabilidade dos taludes.

Os materiais mais comumente empregados na construção desta camada são aqueles que possuem características granulares. Segundo (KOERNER & DANIEL, 1997), a camada de drenagem deve possuir as seguintes características:

- Espessura mínima de 300 mm e seção inclinada (talude) com o mínimo de 3% de inclinação, no fundo da camada;
- Condutividade hidráulica do material drenante não deve ser inferior a 1×10^{-2} cm/s;
- Prever a inclusão de uma camada de filtro entre a camada de drenagem e a camada de proteção acima para prevenir a obstrução excessiva da camada de drenagem por partículas finas.

2.4.4 Camada de Barreira Hidráulica/gás

A camada de barreira hidráulica tem como objetivo a diminuição da percolação de água pelo sistema de camadas, bloqueando o fluxo de líquidos, além de promover indiretamente o seu armazenamento e drenagem por escoamento, evapotranspiração e drenagem interna (MARQUES, 1998).

A camada de barreira consiste em uma única camada, podendo ser utilizadas diversas combinações de materiais de baixa-permeabilidade, cuja função principal é diminuir a infiltração de água e ter baixa condutividade hidráulica (GILL et AL., 1999). Dentre estes materiais, os mais utilizados são as geomembranas, GCL (camada de argila geossintética) e bentonita. O GCL constituído por bentonita sódica apresenta uma condutividade hidráulica na ordem de 1×10^{-9} a 5×10^{-9} cm/s (BARROS, 2005).

2.4.5 Camada Coletora de Gás

Segundo BARROS (2005), os materiais usados na construção da camada coletora de gás deverão ter especificações similares aos materiais granulares usados na camada de drenagem ou similares aos materiais geossintéticos de drenagem.

Na construção desta camada devem ser observadas as seguintes especificações (KOERNER e DANIEL, 1997):

- Quando for utilizado solo natural, a camada deverá ter espessura mínima de 300 mm;

- Geossintéticos podem ser usados, desde que tenham características de transmissividade equivalentes;
- Os materiais utilizados nesta camada deverão ser granulares e altamente permeáveis, como cascalhos e pedregulhos;
- Quando for utilizado solo natural nesta camada, deverá existir um ponto de abertura para o exterior para a disposição e tratamento;

2.4.6 Camada de Base

Nessa camada, há um trabalho intenso de compactação, por meio de rolo compactadores, que é realizado repetidamente, contribuindo para formação de uma adequada massa de resíduo, seu propósito é separar os resíduos da cobertura e estabelecer adequada superfície (KOERNER & DANIEL, 1997).

Para a camada de fundação, o solo ideal é aquele que possui coeficiente de permeabilidade inferior a $5,0 \times 10^{-6} \text{ cm.s}^{-1}$, e em outros casos, na mesma camada de base, pode-se construir uma camada de 30 cm de espessura com material granular para a coleta de gases (KOERNER & DANIEL, 1997).

2.5 Solos Naturais como Cobertura de Aterros Sanitários

A utilização de solos naturais em cobertura de aterro sanitário acaba por exigir uma demanda razoável deste tipo de material, assim

contribuindo com degradação ambiental das áreas onde estão inseridas as jazidas de solos. Dentre esses problemas ambientais pode-se destacar a retirada de cobertura vegetal, a escavação dos taludes naturais, deste modo contribuindo com aumento da erosão hídrica, dando origem a sulcos, ravinas, voçorocas e facilitando o carregamento de partículas de solo.

Para utilização de solos como cobertura de aterro sanitário, o mesmo deve atender a certos índices físicos, que são obtidos através de ensaios de mecânica dos solos. Cada camada componente de um sistema de cobertura final contém suas características geotécnicas conforme a finalidade do tipo de cobertura. Para camada com finalidade de impermeabilização, o fundamental é que, ao se escolher um solo misturado ou não com outros materiais, atenda-se aos critérios mínimos de permeabilidade, granulometria, plasticidade entre outras características, para se garantir uma impermeabilização (ROCCA et al, 1993).

A permeabilidade e o tamanho das partículas são parâmetros extremamente necessários para utilização de solos naturais em cobertura final de aterro sanitário. Conforme ROCCA et al (1993), um solo argiloso para ser considerado adequado como impermeabilizante de aterros, deve atender às seguintes características:

- Ser classificado como CL, CH, SC, ou OH, segundo o sistema unificado de classificação de solos (ASTM STANDARD D2487-69);
- Apresentar uma porcentagem maior do que 30% de partículas passando pela peneira nº 200 da ASTM

(Análise Granulométrica por peneiramento e sedimentação, conforme MB 32/1968 da ABNT);

- Apresentar Limite de Liquidez maior ou igual a 30% (Ensaio limite de liquidez NBR 5469 da ABNT);
- Apresentar índice de plasticidade maior ou igual a 15;
- Apresentar pH maior ou igual a 7 e
- Apresentar coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 10^{-7} cm/s, quando compactado.

As características geotécnicas dos solos descritas por (ROCCA et al, 1993) são para solos utilizados em camadas de fundação de aterro de resíduos sólidos industriais, visto que para esta camada os parâmetros geotécnicos são mais rigorosos do que para os solos utilizados em camadas de cobertura final de aterro sanitário. Segundo a NBR 10157, aterros de resíduos sólidos industriais devem ser executados em áreas onde há predominância de subsolo com coeficiente de permeabilidade inferior a $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s.

Segundo Gomes (2003), os requerimentos recomendados para alcançar a condutividade hidráulica (k) menor ou igual a 10^{-7} cm/s são:

- Porcentagem de finos (peso seco passante na peneira 200, cuja abertura corresponde a 0,075 mm): $\geq 20\%$, idealmente $\geq 30\%$;
- Porcentagem de pedregulhos (peso seco retido na peneira 4 (abertura de 4,76 mm)): $\leq 30\%$;
- Índice de plasticidade ($IP = LL - LP$): $\geq 7\%$, idealmente $\geq 10\%$;

- Tamanho máximo de partícula: ≤ 50 mm, idealmente ≤ 25 mm;

2.6 Reaproveitamento de Resíduos como Cobertura de Aterro Sanitário

Atualmente existem vários estudos sobre materiais alternativos para cobertura final e intermediária de aterro sanitário, como reaproveitamento de areias usadas de fundição, resíduos da construção e demolição, lodos provenientes de sistemas de tratamentos de água e esgotos.

Qualquer material que seja considerado seguro e estável para o sistema de cobertura pode ser considerado como material alternativo de cobertura (MAGALHÃES, 2005). O fundamental para a utilização de materiais alternativos em sistema de cobertura final é que suas propriedades geotécnicas, químicas e biológicas se enquadrem com os parâmetros mínimos requeridos para essas camadas de cobertura, de acordo com normas técnicas existentes ou recomendações de pesquisadores.

Segundo KOERNER & DANIEL (1997), de acordo com seus modelos de cobertura final para climas semi-áridos, o agregado reciclado miúdo proveniente dos resíduos das construções e demolições (RCD) possui as propriedades geotécnicas do material utilizado como camada de superfície e de camada capilar, sendo este resíduo apto e ser utilizado como material alternativo a estas camadas.

Uma nova tecnologia (CSS) para a solidificação do lodo de esgoto digerido foi desenvolvida utilizando um conversor de escória

como agente de solidificação rápida e cal como o auxílio na solidificação. A tecnologia CSS foi investigada através da análise das propriedades físico-químicas dos lodos solidificados e da determinação de suas características microestruturais. Segundo EUNG-HO KIM et al (2005) o lodo solidificado usando a tecnologia CSS exibiu propriedades geotécnicas adequadas para a substituição a coberturas de aterro sanitário. A viabilidade da utilização dos lodos solidificados como material de cobertura de aterros foi considerado no contexto econômico da reciclagem de resíduos EUNG-HO KIM et al (2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A construção da metodologia partiu dos resultados obtidos na pesquisa de PRIM (2006). Como já foi escrito na introdução deste trabalho, a mistura do 42,5% de LETE + 42,5% de LETA + 15% alcalinizante, ou seja, 85% de resíduos e 15% de CaO, mistura representada pela sigla – AE15 (mistura de lodo de Esgoto com lodo de Água com **15%** de CaO), foi entre as misturas avaliadas a que melhor atendeu as necessidades sanitárias para uso como cobertura de aterro sanitário considerado. Foi observado nas análises geotécnicas realizadas nas diferentes misturas de LETE e LETA com alcalinizante que nenhuma das amostras analisadas apresentou as características apropriadas para uso como cobertura de aterro sanitário. A questão econômica também foi analisada num estudo prévio de análises de investimento adicionando-se 50% de solo natural à mistura. Este estudo mostrou que se comprovada a viabilidade geotécnica da pesquisa, este material traz excelentes vantagens econômicas, mesmo adicionando a mistura AE15, 50% de solo natural. Ao mesmo tempo, sabe-se que, estudos geotécnicos sobre solos argilosos demonstram que em torno da adição de 10% em misturas com outros materiais começam a predominar as características geomecânicas do solo argiloso (CABRAL, 2006). A partir destes resultados e teorias PRIM (2006) concluiu que havia necessidade de adicionar um material que melhorasse as propriedades geotécnicas do AE15.

Desta forma foi proposto como metodologia para este trabalho avaliar as características geotécnicas da mistura AE15 com diferentes percentuais de solo natural, determinando fazer análises geotécnicas de misturas com 10%, 30%, 50% de solo natural. Traçou-se então, o plano

metodológico conforme fluxograma abaixo Figura 4. A seguir serão descritas as etapas apresentadas no fluxograma da metodologia, bem como, as atividades relacionadas com o mesmo.

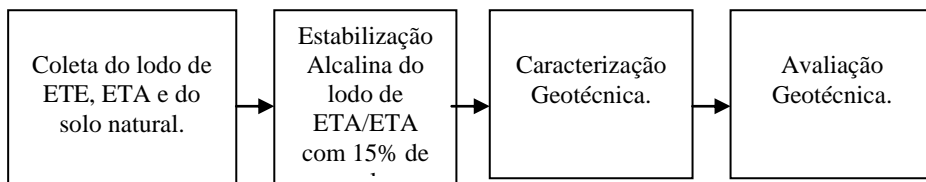


Figura 4 - Fluxograma da Metodologia.

3.1 Origem e Coleta dos Lodos e do Solo Natural

3.1.1 Lodo de LETE e LETA

O lodo de esgoto empregado foi produzido pelo processo de tratamento biológico de esgotos, através do sistema de lodos ativados por batelada - SBR (Sequencing Batch Reactors), pertencente a SAE (Sistemas de Água e Esgotos), de Jurerê Internacional, localizadas na cidade de Florianópolis. O lodo da ETA foi proveniente do decantador de um sistema convencional de tratamento – floculador, decantador e desinfecção - também pertencente a SAE. Ambos os lodos foram coletados nos respectivos leitos de secagem das estações. A coleta dos resíduos foi realizada manualmente, segundo NBR - 10007/2004, sendo posteriormente acondicionados em bombonas plásticas de 60 l, conforme a Figura 5.



Figura 5 - Bombonas de 60 L para Coleta de Lodo e Leitos de secagem de lodo da ETE e ETA

Os lodos provenientes do SAE que foram utilizados neste trabalho são classificados como resíduos sólidos, classe II A – não inertes, e tem como seu destino final o aterro de resíduos indústrias da SANTEC, localizado no município de Içara - SC.

3.1.2 Solo Natural

O solo natural foi extraído de uma jazida localizada no município de Governador Celso Ramos-SC, mesma região onde é extraído o solo de cobertura do aterro sanitário do município de Biguaçu-SC.

O material foi seco ao livre até a umidade higroscópica para encaminhar para o laboratório de ensaios.

3.2 Estabilização Alcalina

É necessária a utilização de cal virgem no processo de estabilização de misturas que contem LETE devido à presença de microrganismos patogênicos. Pois, o despreendimento de calor na reação exotérmica formada e o aumento do pH, inibi o crescimento e a presença de patógenos. No caso do LETA, a utilização de cal virgem

serve para elevar o pH e assim precipitar os metais presentes. Os metais pesados precipitam sob a forma de hidróxidos. A Figura 6 ilustra o processo de mistura dos materiais.

A estabilização alcalina foi realizada com a mistura de 42,5% de matéria seca do lodo de ETE para 42,5% de matéria seca do lodo de ETA, com 15% do alcalinizante (cal virgem). O teor de umidade e densidade foram obtidos conforme as normas do STHANDARD METHODS para lodos. A mistura foi realizada com argamassadeira com um tempo de mistura de doze minutos (Figura 6).



Figura 6 - Processo de mistura dos materiais, calagem, armazenagem e maturação.

Após obtenção da amostra AE15 deu-se início ao processo de maturação, onde a amostra foi armazenada em estufa por um período de maturação de 45 dias. Após este período o material se apresentou seco, conforme mostra a ultima imagem da Figura 6. Em seguida, o material foi destorroado e deixado secar até a umidade higroscópica, estando assim pronto para ser misturado com solo natural e realizar os ensaios geotécnicos.

3.3 Caracterização Geotécnica

De acordo com a revisão bibliográfica as principais características geotécnicas a serem avaliadas num material para uso em cobertura de aterro estão apresentadas na Tabela 4. A realização dos ensaios seguiu as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, conforme se apresenta na Tabela 4. Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina.

Tabela 4 - Ensaios de Mecânica dos Solos e Respectivas Normas

| Ensaio | Método da ABNT |
|---------------------------------|-----------------------|
| Preparação das amostras | NBR 6457 / 1986 |
| Teor de Umidade | NBR 6457 / 1986 |
| Análise granulométrica | NBR 7181 / 1984 |
| Limite de Liquidez | NBR 6459 / 1984 |
| Limite de plasticidade | NBR 7180 / 1984 |
| Massa específica dos grãos | NBR 6508 / 1984 |
| Compactação | NBR 7182 / 1986 |
| Permeabilidade (carga variável) | NBR 14545 / 2000 |
| Expansão | NBR 9895/1987 |

Os ensaios foram realizados nas seguintes amostras, conforme se apresenta na Tabela 5.

Tabela 5 - Descrição dos Materiais

| AMOSTRA | DESCRIÇÃO |
|-------------------------|---|
| Solo Natural | Solo adicionado aos lodos |
| AE15 | Mistura de 42,5% de LETE + 42,5% de LETA + 15% alcalinizante (85% de resíduos e 15% de CaO) |
| AE15 + 10% Solo natural | Mistura do AE15 + 10% de solo natural |
| AE15 + 30% Solo natural | Mistura do AE15 + 30% de solo natural |
| AE15 + 50% Solo natural | Mistura do AE15 + 50% de solo natural |

Obs.: Sabe-se que o ensaio de cisalhamento direto é tão importante quanto os ensaios acima citados, principalmente na definição da inclinação do talude que poderá ser realizada com o material estudado. No entanto, neste trabalho não serão apresentados os resultados deste parâmetro nesta etapa da pesquisa, por falta de material base – AE15.

3.3.1 Preparação das Amostras

Para preparar as amostras foi utilizada a norma NBR 6457 que trata dos métodos de preparação de amostras para realização dos ensaios geotécnicos. O método de preparação consiste basicamente em destorroar a amostra em um almofariz com mão de gral (Figura 7) e passar na peneira com a malha adequada a do ensaio a realizar. A Tabela 6 indica a abertura das malhas para os respectivos ensaios geotécnicos.



Figura 7 - Utensílios para Preparação das Amostras

Tabela 6 - Ensaio Geotécnico e Respectiva Abertura da Malha das Peneiras

| Ensaio | Abertura da peneira |
|----------------------------|----------------------------|
| Massa específica dos grãos | 4,8 mm |
| Análise granulométrica | 2,00 mm |
| Limite de Liquidez | 0,42 mm |
| Limite de plasticidade | 0,42 mm |
| Compactação | 4,8 mm |
| Permeabilidade | 4,8 mm |
| Expansão | 4,8 mm |

3.3.2. Preparação das Amostras de solo-lodo

As amostras solo-lodo foram obtidas com preparação separadamente do solo e do resíduo (lodo), conforme a Figura 8. Depois as amostras de solo-lodo foram misturadas manualmente, com um percentual de 10%, 30% e 50% do solo natural, até obter certo grau de homogeneização.



Figura 8 - Preparação da Amostra de lodo Estabilizado (AE15) e do Solo Natural

3.3.3 Teor de Umidade

O ensaio de determinação do teor de umidade é realizado, durante outros ensaios, sempre que se faz necessário. O método utilizado foi o Método da Estufa, cujo procedimento consiste em colocar certa quantidade de amostra, que é função da dimensão dos grãos, em uma cápsula numerada e previamente pesada. Em seguida pesa-se o conjunto “cápsula + solo úmido”, levando-o à estufa durante um intervalo de 16 a 24 horas, a fim de que toda a água existente no solo seja eliminada. Pesa-se então o conjunto “cápsula + solo seco”, e calcula-se o teor de umidade a partir da seguinte fórmula:

$$H (\%) = \frac{P_2 - P_3}{P_3 - P_1} * 100$$

Onde:

P_1 = peso da cápsula;

P_2 = peso do conjunto “cápsula + solo úmido”;

P_3 = peso do conjunto “cápsula + solo seco”

3.3.4 Ensaio Proctor Normal

O ensaio de compactação será realizado segundo a NBR 7182, sem reuso de material, sobre amostras preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. Para as amostras em questão foi utilizado o procedimento da câmara úmida, que é recomendado para solos com difícil absorção de umidade. Este processo consiste em umedecer a amostra até a umidade de partida do ensaio de compactação e preservá-la, em sacos plásticos bem fechados, na câmara úmida por pelo menos 24 horas, para que assim os grãos possam absorver de fato a umidade desejada. Após a amostra ter sido homogeneizada, é realizada a compactação.

A compactação é um processo no qual se visa melhorar as propriedades do solo garantindo certa homogeneidade procedendo-se a eliminação do ar. É um método de estabilização que se dá por aplicação de energia (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Seu efeito confere ao solo um aumento de seu peso específico aparente seco e resistência ao cisalhamento, e uma diminuição do índice de vazios, permeabilidade e compressibilidade.

O ensaio mais comum é o de Proctor (Normal, Intermediário ou Modificado), que é realizado através de sucessivos impactos de um soquete padronizado na amostra (Figura 9). Através do ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico aparente seco de um solo quando compactado com determinada energia (Figura 10).

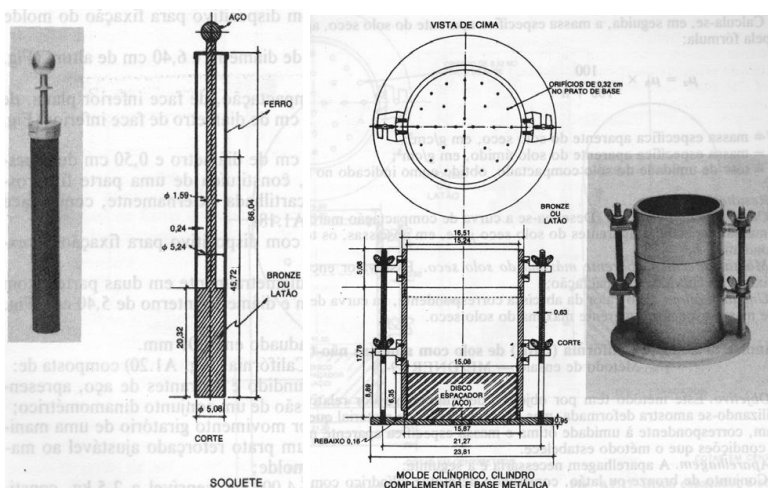


Figura 9 - Ensaio Proctor Normal

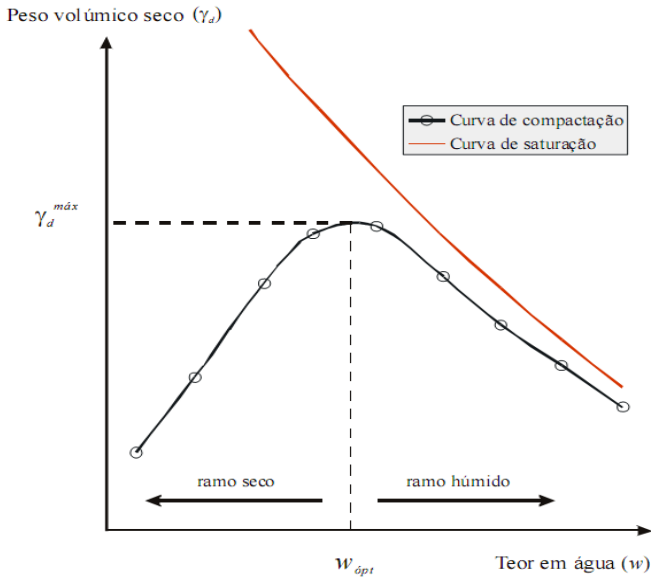


Figura 10 - Curva de Compactação

Fonte: Jaime A. Santos (2008)

3.3.5 Granulometria

O ensaio de granulometria consiste em determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência, de forma a se obter o traçado da curva granulométrica da amostra ensaiada (**Figura 11**). Para tal foi realizada a Análise granulométrica conjunta, que compreende tanto o peneiramento quanto a sedimentação. O Método do Peneiramento separa as partículas até a dimensão de 0,074 mm (peneira Nº 200), já o Método da Sedimentação em água destilada é utilizado para as partículas menores que 0,074 mm.

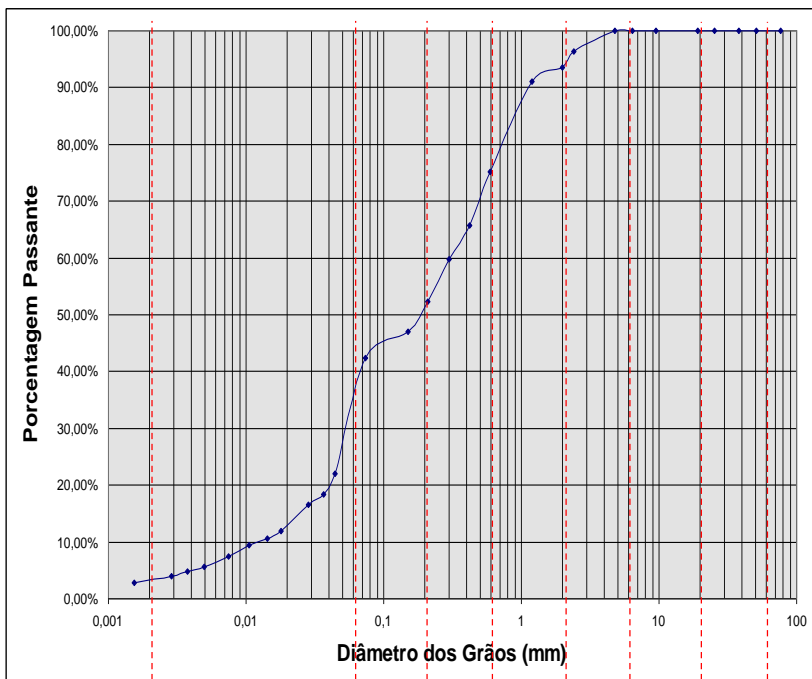


Figura 11 - Curva Granulométrica.

3.3.6 Limite de Liquidez

A Determinação do Limite de Liquidez seguiu o método prescrito na norma NBR 6459:1984. O ensaio consiste em umedecer levemente a amostra, previamente preparada, com água destilada em uma cápsula de porcelana e continuamente revolvida com o auxílio de uma espátula durante pelo menos 30 minutos. Após este processo a amostra é transferida para a concha do aparelho Casa Grande (Figura 12), moldando-a de forma que na parte central a espessura atingisse no máximo 10 mm. Uma ranhura será aberta na parte central da amostra com o auxílio de um cinzel, dividindo a massa de solo em duas partes.

Após segue-se a determinação no aparelho Casa Grande, submetendo a concha à um determinado número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento aproximadamente. Este ensaio deve ser repetido para a mesma amostra em pelo menos cinco teores de umidade diferentes. O limite é determinado, então, através de um gráfico que relaciona o número de golpes com a umidade.



Figura 12 - Ensaio de Limite de Liquidez

3.3.7 Limite de Plasticidade

Para a determinação do Limite de Plasticidade foi adotada a NBR 7180:1984. O ensaio consiste em umedecer uma amostra, previamente preparada, com água destilada até se obter uma pasta homogênea de consistência plástica. Com aproximadamente 10 gramas desta amostra, formar cilindros rolando o material sobre uma placa de vidro com o uso das mãos, de forma a obter um cilindro com 3mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (o que se verifica com gabarito de comparação), sem fragmentação, como mostra a Figura 13. De cada rolo determinar a umidade através da estufa, resultando num total de quatro

valores, a média destes valores expressa o LP. Portanto, o LP é o mínimo teor de umidade com o qual é possível moldar o rolo.



Figura 13 - Ensaio de Limite de Plasticidade

3.3.8 Massa Específica dos Grãos

Para determinação da massa específica dos grãos utilizou-se o Método do Picnômetro, segundo a NBR 6508. Tal ensaio consiste na utilização de uma bomba de vácuo para a extração do ar contido num picnômetro de 500ml (Figura 14), contendo aproximadamente 50 gramas da amostra e completo com água destilada. Essa retirada do ar permite, através de diferença de pesos, e da utilização da relação da massa específica da água com a temperatura, calcular a densidade real dos grãos. Esse valor encontrado é também utilizado na análise granulométrica, na etapa de sedimentação.



Figura 14 - Densidade dos Grãos

3.3.9 Permeabilidade

O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade (k) com carga variável foi realizado segundo a NBR 14545, pelo método B. O k é a propriedade que o solo apresenta de permitir a passagem de água através dele mesmo (Caputo, 1988). Os coeficientes de permeabilidade são tão menores quanto menores os índices de vazios do solo e consequentemente quanto menores as partículas. Os solos com baixos coeficientes de permeabilidade, na ordem 10^{-7} cm/s ou menos, é que devem ser utilizados como cobertura de aterros sanitários para fins de impermeabilização. Portanto a amostra AE15 + solo tem que ter o seu k nessa ordem, para não ocorrer a penetração de água pluvial na massa de resíduos, contribuindo para uma menor volume de líquidos percolados.

Para amostra AE15 + solo foi utilizado um permeâmetro com carga variável (Figura 15), A equação abaixo demonstra como obter o k .

$$K = 2,3 \cdot \left(\frac{a \cdot L}{A \cdot T} \right) \cdot \log \left(\frac{H_0}{H_1} \right)$$

Onde:

a = área da seção transversal da bureta.

A = área do corpo de prova.

H_0 = carga hidráulica inicial

H_1 = carga hidráulica final.

t = intervalo de tempo

L = Altura do Corpo de Prova



Figura 15 - Etapas do Ensaio de Permeabilidade

3.3.10 Expansão

Para determinar a expansão da amostra, foi realizado o Ensaio de Expansão, segundo a NBR 9895. Este ensaio tem por objetivo

verificar se durante a utilização do material em campo ocorrerá o aparecimento de fissuras ou trincas na camada de cobertura. A presença de fissuras acarretará numa possível infiltração de águas pluviais, contribuindo desta maneira para o aumento do volume do percolado. A Figura 16 demonstra o equipamento utilizado para a realização deste ensaio.



Figura 16 - Ensaio de Expansão CBR

A expansão do corpo-de-prova é calculada utilizando-se a seguinte expressão:

$$\text{Expansão (\%)} = (\Delta H / H_0) \cdot 100$$

Onde: ΔH = leitura final – leitura inicial

H_0 = leitura inicial

3.4 Sistema Unificado de Classificação

Proposto por Arthur Casagrande (1948), com modificações subsequentes em 1952 e 1960. Este sistema classifica os solos em duas amplas categorias: solos grossos e solos finos. A Tabela 7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 17 representam um resumo do sistema unificado de classificação de solos.

3.4.1 Solos Grossos

Segundo a NBR 6502 inclui pedregulhos (G) e areias (S). Os pedregulhos possuem o tamanho dos grãos acima de 2,0 mm (peneira nº 4) e abaixo de 60 mm (NBR 6502). As areias tem sua granulometria compreendidas entre 0,075mm e 2,00 mm. Por sua vez, elas são divididas em grossas, médias e finas. As areias grossas possuem diâmetro entre 4,75 mm e 2,0 mm (peneira nº10). As areias médias entre 2,0 mm e 0,425 mm. As areias finas possuem diâmetro entre 0,425 mm e 0,075 mm. Os solos são considerados de granulometria grossa quando mais de 50% do material é maior que 0,075 mm. São considerados como pedregulhos se mais de 50% possuem tamanho acima 4,75 mm e considerados arenosos se mais de 50% estão abaixo de 4,75 mm.

3.4.2 Solos Finos

Compreendem os siltes e argilas, representados pela letra M e C respectivamente. Os solos finos possuem mais de 50% do tamanho dos grãos passante na peneira nº 200 e podem ser classificados de acordo com seu limite de liquidez. Solos que possuem LL menor que cinquenta podem ser classificados como ML, CL, OL. Solos que possuem LL

maior que cinquenta podem ser classificados como MH, CH, OH. O índice de plasticidade – IP é outro critério usado para separar as argilas de siltes.

Tabela 7 - Resumo do Sistema Unificado de Classificação

| Classificação Geral | Tipos Principais | | | Símbolos |
|---|--|---|---|----------|
| SOLOS GROSSOS (menos 50% passante na #200) | Pedregulhos ou Solos Pedregulhosos (Mais de 50% da fração grossa retida na peneira nº 4) | Pedregulhos Puros | $Cu \geq 4$ e $1 \leq Ce \leq 3$ | GW |
| | | Menos de 5% de finos | $Cu < 4$ e/ou $1 > C > 3$ | GP |
| | | Pedregulhos finos | $IP < 4$ ou representado abaixo da linha A | GM |
| | | Mais de 12% de finos | $IP > 7$ ou representado na ou acima da linha A | GC |
| | Areias ou Solos Arenosos (50% ou mais da fração grossa passam na peneira nº 4) | Areias puras | $Cu \geq 6$ e $Ce \leq 3$ | SW |
| | | menos 5% de finos | $Cu < 6$ e/ou $1 > Ce \leq 3$ | SP |
| | | Areias com finos | $IP < 4$ ou representado abaixo da linha A | SM |
| | | Mais de 12% finos | $IP > 7$ e representado na ou acima da linha A | SC |
| SOLOS FINOS (mais de 50% passante na # 200) | Siltosos ou Argilosos | $LL < 50$ | | |
| | | Inorgânico | $IP > 7$ e representado na ou acima da linha A | ML |
| | | | $IP < 4$ ou representado abaixo da linha A | CL |
| | | Orgânico | (LL-seco em estufa)/(LL - não seco) $< 0,75$ | OL |
| | | $LL > 50$ | | |
| | | Inorgânico | IP representado na ou abaixo da linha A | CH |
| | | | IP representado na ou acima da linha A | MH |
| | | Orgânico | (LL-seco em estufa)/(LL - não seco) $< 0,75$ | OH |
| SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS | Turfas | matéria primariamente orgânica, de cor escura e odor orgânico | | PT |

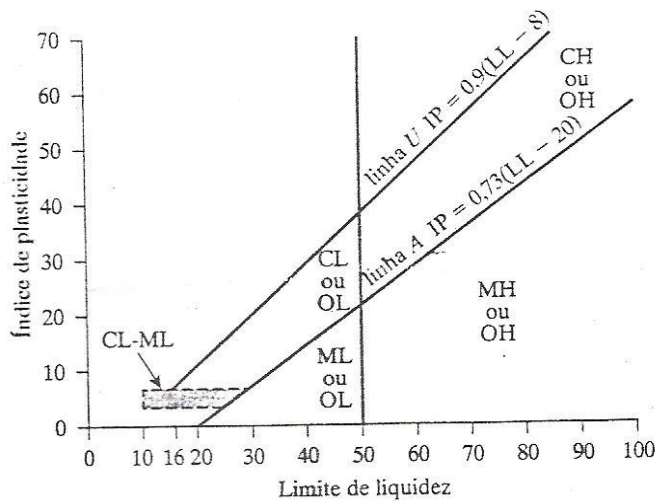


Figura 17. Gráfico de Plasticidade

Fonte: DAS Baja M., (2006)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Introdução

A avaliação geotécnica foi realizada procurando-se comparar os resultados com as necessidades geotécnicas para uso em cobertura final de aterro sanitário, encontradas na bibliografia e nas normas a nível nacional. Procurou-se também dar uma interpretação quanto ao que a teoria apresenta sobre a utilização do sistema de múltiplas camadas no sistema de cobertura final, apesar de não ser uma exigência no Brasil.

Atualmente no Brasil as normas técnicas relacionadas não especificam as características geotécnicas que devem ser consideradas no projeto e execução de aterros de resíduos. As únicas especificações relacionadas são quanto a impermeabilização e condutividade, onde na NBR 10157- Aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação - é definido como impermeabilização a deposição de camadas de materiais artificiais ou naturais, que impeça ou reduza substancialmente a infiltração no solo dos líquidos percolados, através da massa de resíduos. E quanto a permeabilidade, refere-se a escolha do local para instalação do aterro: o aterro deve ser executado em áreas onde haja predominância no subsolo de material com coeficiente de permeabilidade inferior a $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, os seguintes parâmetros foram levados em consideração para fazer a interpretação dos resultados:

Um solo argiloso para ser considerado adequado como impermeabilizante de aterros, deve atender às seguintes características (Rocca et al,1993):

- Ser classificado como CL, CH, SC, ou OH, segundo o sistema unificado de classificação de solos (ASTM STANDARD D2487-69);
- Apresentar uma porcentagem maior do que 30% de partículas passando pela peneira n.º200 da ASTM (Análise Granulométrica por peneiramento e sedimentação, conforme NBR 6459);
- Apresentar Limite de Liquidez maior ou igual a 30% (Ensaio limite de liquidez MB 30/1969 da ABNT);
- Apresentar índice de plasticidade maior ou igual a 15;
- Apresentar pH maior ou igual a 7 e
- Apresentar coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 10^{-7} cm/s, quando compactado.

4.2 Ensaio Proctor Normal

A realização dos ensaios de compactação com as misturas solo-lodo, mostrou o efeito da adição dos diferentes teores de solo natural à amostra AE15. Os resultados dos ensaios forneceram as curvas representadas na Figura 18. Pode-se observar nos gráficos que comparando o teor de umidade ótima das misturas solo-lodo com o da amostra AE15 nota-se que a mistura com solo natural exigiu bem menos água na mistura que o AE15 sozinho, aumentando a massa específica.

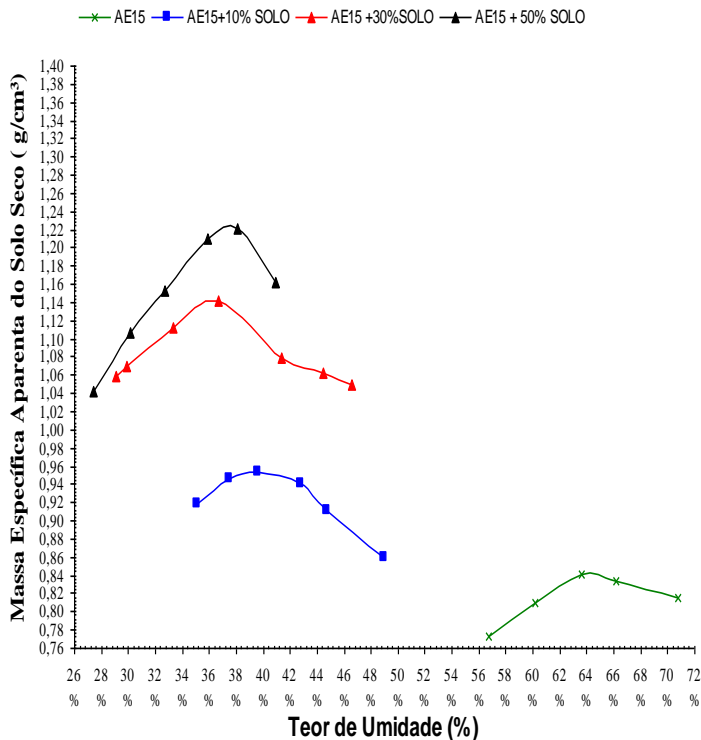


Figura 18 - Curvas Proctor Normal

Com relação às curvas de compactação das misturas solo-lodo verifica-se o ligeiro crescimento da massa específica seca máxima em função do aumento do teor de solo para os diferentes teores considerados, indicando que o acréscimo de solo altera as propriedades físicas da amostra AE15.

A amostra AE15+50%SOLO foi a que obteve um melhor resultado geotécnico, atingindo uma massa específica máxima de 1,22 g/cm³ com 37,51% de umidade, valores de acordo com o de solos naturais (Tabela 8).

De acordo com estes parâmetros pode-se dizer que esse material é apropriado para uso em camada superficial. Raízes de plantas crescem bem em substrato que possui densidade 1,1 a 1,5 g.cm-3, crescem moderadamente bem em solos com densidade de até 1,7 g.cm-3, e pobremente ou não crescem a densidades mais altas (Neto, 1995; Dias, 1998).

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de compactação e índice de vazios

| AMOSTRA | UMIDADE ÓTIMA (%) | DENSIDADE MÁXIMA(g/cm ³) | ÍNDICE DE VAZIOS |
|--------------|----------------------|---|------------------------|
| AE15 | 64,2 | 0,843 | 1,21 |
| AE15+10%SOLO | 39,40 | 0,954 | 1,30 |
| AE15+30%SOLO | 36,40 | 1,143 | 1,02 |
| AE15+50%SOLO | 37,9 | 1,22 | 1,02 |

4.3 Granulometria

A caracterização das amostras, definida a partir de ensaios de granulometria mostra forte predominância da fração areia (de areia grossa, areia média e areia fina) e secundariamente fração de silte, caracterizando as mesmas como um solo arenoso, pois mais de 50% do diâmetro dos grãos são retidos na peneira nº200 (0,075 mm) e mais de 50% passante na peneira nº4 (4,8mm). A partir da análise do ensaio de granulometria (Figura 19 e Tabela 9 - Resultados Granulométricos), classificou-se as amostras segundo a classificação ASTM e AASHTO como:

AE15+10%SOLO – A3 - areia fina (AASHTO)

AE15+30%SOLO – A3 - areia fina (AASHTO)

AE15+50%SOLO – MH ou OH (ASTM)

Apesar das amostras serem classificadas segundo o sistema unificado de classificação como inorgânicas (pois mais de 50% do diâmetro dos grãos ficam retidas na peneira n° 200), as amostras possuem uma origem orgânica, pois parte da composição é originada dos tanques de decantação das estações de tratamento de esgotos. A amostra AE15+50%SOLO teve 54% do diâmetro das partículas retidas na peneira n° 200, ou seja, valor muito próximo do limite que é de 50%. Se esta amostra fosse classificada como um solo fino, segundo o sistema ASTM, seria MH ou OH. Esta classificação não se enquadra nos critérios de Rocca, et al (1993).

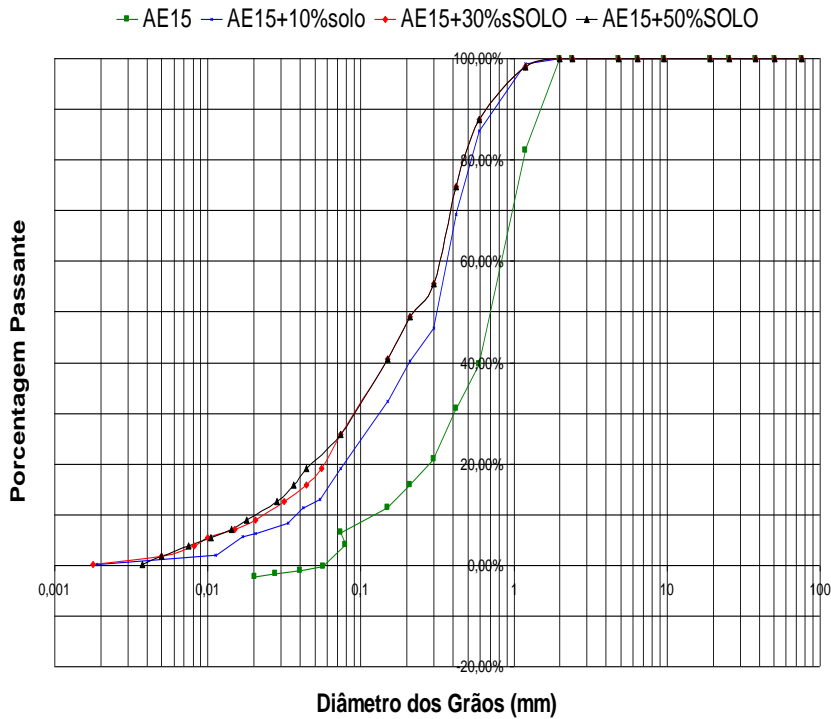


Figura 19 - Curvas Granulométricas

Tabela 9 - Resultados Granulométricos

| AMOSTRA | ARGILA | SILTE | AREIA FINA | AREIA MEDIA | AREIAGROSSA |
|--------------|--------|--------|------------|-------------|-------------|
| AE15 | 0% | 0% | 9,36% | 23,72% | 60,40% |
| AE15+10%SOLO | 0,14% | 14,76% | 25,38% | 45,56% | 14,16% |
| AE15+30%SOLO | 0,22% | 20,67% | 28,09% | 38,93% | 12,09% |
| AE15+50%SOLO | 3,25% | 18,71% | 30,34% | 22,95% | 18,28% |

4.4 Índice de Plasticidade

O índice de plasticidade para solos é definido como o limite de liquidez menos o limite de plasticidade, a Tabela 10 demonstra os resultados obtidos para as misturas de solo com lodo estabilizado.

Tabela 10 - Índice de Plasticidade

| AMOSTRA | LIMITE DE LIQUIDEZ | LIMITE DE PLASTICIDADE | ÍNDICE DE PLASTICIDADE |
|--------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| AE15 | Não Líquido | Não Plástico | X |
| AE15+10%SOLO | Não Líquido | Não Plástico | X |
| AE15+30%SOLO | Não Líquido | Não Plástico | X |
| AE15+50%SOLO | 63% | 38% | 25% |

Os resultados de LL e LP para as amostras AE15, AE15+10%SOLO e AE15+30%SOLO foram de não liquidez e não plástico, portanto não foi possível realizar os dois ensaios, e assim, não se pode determinar o índice de plasticidade.

Já a amostra AE15+50%SOLO obteve um índice de plasticidade de 25%, segundo ROCCA et al (1993), dentro dos parâmetros para solos a serem utilizados em cobertura final de aterros.

4.5 Massa Específica dos Grãos

Os resultados dos ensaios para determinação da massa específica mostram que com o aumento do teor de solo ocorre grande aumento na densidade real dos grãos (Tabela 11).

Tabela 11 - Densidade Real dos Grãos

| AMOSTRA | DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (g/cm ³) |
|--------------|--|
| AE15 | 1,87 |
| AE15+10%SOLO | 2,19 |
| AE15+30%SOLO | 2,31 |
| AE15+50%SOLO | 2,47 |

4.6 Permeabilidade

Segundo Gomes (2003), os requerimentos recomendados para alcançar a condutividade hidráulica (k) menor ou igual a 10^{-7} cm/s são:

- Porcentagem de finos (peso seco passante na peneira 200, cuja abertura corresponde a 0,075 mm): $\geq 20\%$, idealmente $\geq 30\%$;
- Porcentagem de pedregulhos (peso seco retido na peneira 4 (abertura de 4,76 mm)): $\leq 30\%$;
- Índice de plasticidade ($IP = LL - LP$): $\geq 7\%$, idealmente $\geq 10\%$;
- tamanho máximo de partícula: ≤ 50 mm, idealmente ≤ 25 mm;

Os resultados apresentados nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22 referem-se aos ensaios de permeabilidade de carga variável com amostras de solo e lodo estabilizado.

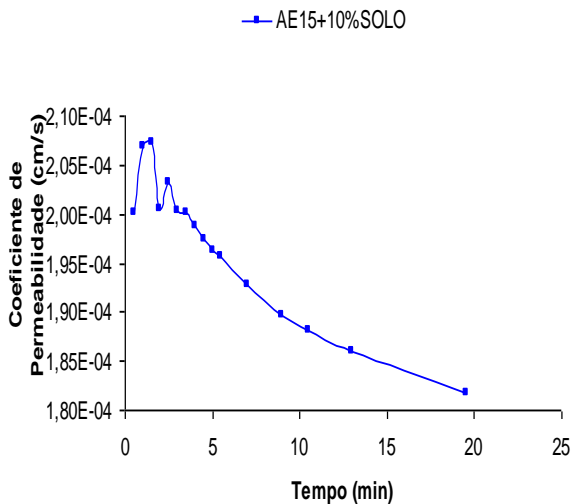


Figura 20 - Permeabilidade AE15+10%SOLO

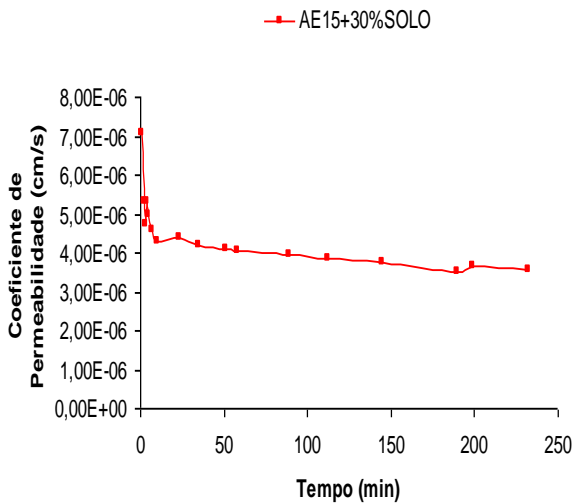


Figura 21 - Permeabilidade AE15+30%SOLO.

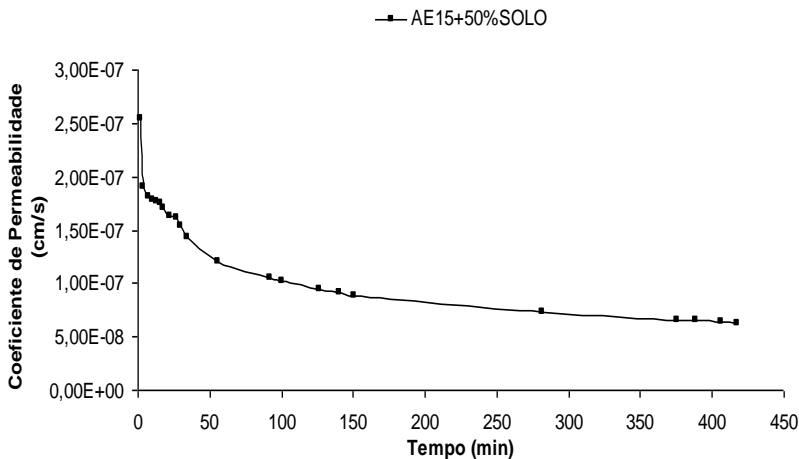


Figura 22 - Permeabilidade AE15+50%SOLO

Analizando os resultados percebe-se que o teor de solo influencia na permeabilidade das amostras e que quanto maior seu teor menor a permeabilidade.

De acordo com os requerimentos sugeridos por DANIEL (2003) e ROCCA et al (1993), a amostra AE15+50%SOLO ($k = 1,24E-07$ cm/s) se enquadra com as características de solos com condutividade na ordem de 10^{-7} cm/s, podendo ser indicado para uso como material de cobertura de aterros com finalidade de impermeabilização.

Quanto à permeabilidade das amostras AE15+10%SOLO e AE15+30%SOLO ocorreu uma anomalia durante a realização do ensaio, devido ao fato do nível de água na bureta subir ao invés de descer durante o procedimento de leitura do ensaio, mas após decorrer certo tempo obteve-se um k (cm/s) de $1,96E-04$ e $4,41E-06$ respectivamente. Isto pode ter ocorrido devido à característica orgânica do material, que pode ter liberado gases neste intervalo do ensaio.

4.7 Expansão

Com objetivo de verificar o aparecimento de fissuras ou trincas numa possível utilização do material em campo foram realizados ensaios de expansão. Os resultados obtidos estão representados na Figura 23 e Tabela 12 - Expansão.

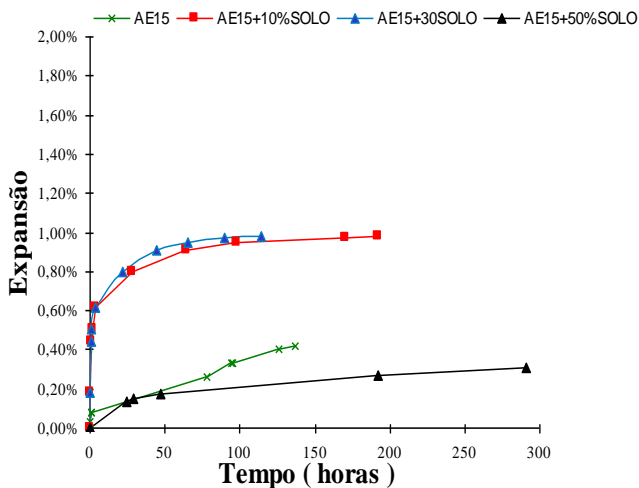


Figura 23 - Expansão

Tabela 12 - Expansão das amostras

| AMOSTRA | EXPANSÃO(%) |
|--------------|-------------|
| AE15 | 0,42 |
| AE15+10%SOLO | 0,60 |
| AE15+30%SOLO | 0,98 |
| AE15+50%SOLO | 0,31 |

A expansão de solos acontece geralmente com aqueles de natureza argilosa ou argilo-siltosa, com percentual de material passando

na peneira 200 freqüentemente acima de 80%. Portanto, os resultados demonstram que amostra AE15+50%SOLO (que é a que apresenta maior porcentagem passante na peneira nº 200, porém menos que 80% - 42,36% do diâmetro das partículas passante), foi a que resultou na menor expansibilidade. Outra observação quanto aos resultados de expansão é que a amostra que contém mais matéria orgânica – AE15 se mostrou menos expansiva do que AE15 + 10% SOLO e AE15+30%SOLO.

A título de agrupamento dos resultados criou-se a Tabela 13, que apresenta o quadro geral dos dados obtidos nos ensaios. E na Tabela 14**Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta-se uma comparação entre as características geotécnicas das camadas componentes de um sistema de cobertura final, com as amostras de solo-lodo.

Tabela 13 - Quadro Geral de Resultados

| Ensaio | Solo natural | AE15 | AE15 + 10% Solo | AE15 + 30% Solo | AE15 + 50% Solo |
|--|--|--|--|--|--|
| Análise granulométrica | Argila 64,23% + Silte 12,15% | Areia grossa 59,97% + Areia média 23,56% | Areia Média 45,56% + Areia Fina 25,38% | Areia Média 38,93% + Areia Fina 28,09% | Areia Fina 18,71% + Silte 22,95% |
| Limite de Liquidez | 86% | Não líquido | Não líquido | Não líquido | 63% |
| Limite de plasticidade | 34% | Não plástico | Não plástico | Não plástico | 38% |
| Massa específica dos grãos (g/cm ³) | 2,62 | 1,865 | 2,19 | 2,31 | 2,47 |
| Compactação H _{ot} (%) γ _{smax} (g/cm ³) | 1,629 | 64,20 | 39,40 | 36,40 | 37,9 |
| | 20% | 0,843 | 0,954 | 1,143 | 1,23 |
| Permeabilidade | 3,99E-07 | * | 1,96E-04 | 4,41E-06 | 1,24E-07 |
| Expansibilidade (%) | 0,03 | 0,42 | 0,60 | 0,98 | 0,31 |

Tabela 14 - Características das camadas e amostras

| CAMADAS | % PASSANTE #200 | CLASSIFICAÇÃO | LL | IP | K(cm/s) |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------|-------------|-----------|---|
| CAMADA SUPERFICIAL | >30% | CL, CH, SC, ou OH | ≥30 | ≥15 | |
| CAMADA DE PROTEÇÃO | >30% | CL, CH, SC, ou OH | ≥30 | ≥15 | |
| CAMADA DE DRENAGEM | X | GW, GP, GM, GC | Não líquido | X | $>1 \times 10^{-2}$ |
| CAMADA DE BARREIRA HIDRAÚLICA/GÁS | >30% | CL, CH, SC, ou OH | ≥30 | ≥15 | 1×10^{-9} a 5×10^{-9} |
| CAMADA COLETORA DE GÁS | X | GW, GP, GM, GC | Não líquido | X | Alta permeabilidade |
| CAMADA DE BASE | >30% | CL, CH, SC, ou OH | ≥30 | ≥15 | $5,0 \times 10^{-6}$ cm.s ⁻¹ |
| AE15+10%SOLO | 19,14% | X | Não líquido | X | 1,96E-04 |
| AE15+30%SOLO | 25,83% | X | Não líquido | X | 4,41E-06 |
| AE15+50%SOLO | 42,36% | MH ou OH | 63% | 25% | 1,24E-07 |

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos propostos inicialmente, é importante destacar o fato da amostra AE15 estudada - amostra esta que passou por processo de estabilização alcalina, numa mistura de iguais proporções de LETE e LETA com adição de 15% de estabilizante CaO - não apresentar, em relação aos parâmetros avaliados nesta pesquisa, resultados satisfatórios para se indicar o uso em camadas de cobertura final de aterro sanitário.

A adição de solo natural indica que o acréscimo de solo melhora as propriedades geotécnicas da amostra AE15 e que na faixa de 50% de solo natural é aceitável para a finalidade aqui estudada. A adição de solo natural reduz a condutividade hidráulica, tornando o material AE15+50%SOLO apto a ser utilizado como cobertura final de aterro sanitário. A composição AE15+50%SOLO atende as características requeridas para utilização de camada superficial, de proteção e de base.

Além de apresentar as características geotécnicas mínimas requeridas para esse tipo de camada de cobertura, sabe-se que o lodo de esgoto vem sendo bastante usado para fabricação de adubo orgânico por apresentar concentrações consideráveis de macro nutrientes (N, P, K). Portanto, pode-se dizer que se usado na cobertura superficial ou de suporte este material estará contribuindo com a proteção contra erosão ao fornecer nutrientes as plantas usadas em coberturas finais com esta finalidade.

Já as amostras AE15+10%SOLO e AE15+30%SOLO não obtiveram as características geotécnicas dos solos utilizados como

cobertura final de aterro sanitário, devido ao fato de serem classificadas como material não líquido e não plástico, sendo assim impossível determinar seu índice de plasticidade.

Face à evolução da condutividade hidráulica das misturas solo-lodo estudadas, verifica-se que a possibilidade de estabilizar lodos de estações de tratamento de água e esgoto pode e deve ser encarada com maior frequência, resultando assim em projetos com menores custos ambientais devido à preservação dos recursos naturais não renováveis.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2007

ANDREOLI, C. V., et al (2001) In ANDREOLI, C. V., *Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento e Disposição Final*, 87-117 p, ABES - PROSAB, Rio de Janeiro, 2001.

ANDREOLI, C.V.;SPERLING V.M.; FERNANDES F., B.R.P et al. **Lodo de esgotos: Tratamento e Disposição Final**. Sanare, Curitiba, v.1,n.1 p.10-16, 1994.

ANDREOLI, C. V., *Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura*, ABES - PROSAB, Rio de Janeiro, 1999

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de Solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7162**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10157**: Aterro de Resíduos Perigosos – Critérios para projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1987.

AWWA-APHA-WPCI – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edit

BARROS, H. L. (2004). *Estudo de Balanço Hídrico em Aterro Sanitário por Meio de Lisímetros de Grandes Dimensões*. Dissertação de Mestrado, Viçosa, MG, 2004.

BARROS, MAURÍCIO CORREA. Avaliação de um Resíduo da Construção Civil Beneficiado como Material Alternativo para Sistema de Cobertura.

CETESB – Companhia de Tecnologia e de Saneamento Ambiental de São Paulo. **Resíduos sólidos industriais**. São Paulo, 1993.

COSTA, C.N. (2006). *Resíduos e Aterros de Resíduos*. Apostila da Disciplina de Fundamentos da Geotecnia. Cap. 7. Universidade Nova de Lisboa. 2006.

COSTA, E.M.P. (2004). *Destinação Final dos Resíduos Sólidos de Serviço de Saúde da Cidade de Crato – CE*. Monografia para Especialização em Ecologia. Departamento de Ciências Físicas e Biológicas, Universidade Regional do Cariri – Urca, 2004.

CAPUTO H. P. Mecânica dos Solos e suas aplicações. Volume 1. 1998

DAS Baja M., (2006). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Thomson

EUNG-HO KIM ; CHO Jin-Kyu ; YIM Soobin. Digested sewage sludge solidification by converter slag (escoria) for landfill cover. Chemosphere (Oxford) Y. 2005, vol. 59,

GILL, M.; HAUSER, V. L.; HORIN, J. D.; WEAND, B. L.; CASAGRANDE, D. J. Landfill Remediation Project Manager's Handbook. Air Force Center for Environmental Excellence *Mitretek Systems Center for Science and Technology*. McLean, Virginia, 1999.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, Implantação e Operação de Aterros Sustentáveis de Resíduos Sólidos Urbanos para Municípios de Pequeno Porte. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. et al. (Org.). **Resíduos Sólidos Urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: RiMa/ABES, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa nacional de saneamento básico**. 2002. Rio de Janeiro.

IPT. 2000. *Manual de Gerenciamento Integrado - Lixo Municipal*.. IPT/CEMPRE, 2. ed,2000.

JAIME A. SANTOS. Obras Geotecnicas. Instituto Superior Técnico. 2008,

KOERNER, R. M. and DANIEL, D. E. Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps, 1 ed. New York, ASCE PRESS,1997.

MAGALHÃES, A.F (2005). Avaliação do Desempenho de Técnicas de Bioengenharia na Proteção e Conservação da Cobertura Final de Taludes em Aterros de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso para o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, MG

MARQUES, A. C. M. *Utilização de geossintéticos em Geotecnia Ambiental. Curso sobre aplicações de geossintéticos em geotecnia e meio ambiente*. São Paulo. 1998.

NETO, J. A. M. *Avaliação do uso de forrageiras e de adubações na recuperação de propriedades químicas e físicas de um solo degradado pela mineração do xisto*. Curitiba: UFPR, 1995. 83 p.

NOGUEIRA, R.C., ROCHA, M. S. *Auditorias Operacionais em Aterros Sanitários*, 12 p. Artigo Técnico apresentado no VI Simpósio Nacional de Auditoria de Obras Públicas. Florianópolis, novembro, 2001.

OLIVEIRA, D.M (2003). Aplicação da Técnica de Solidificação/Estabilização para Resíduos Oleosos da Indústria Petrolífera, Utilizando Solo Argiloso e Bentonita. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, abril 2003.

PROSAB, 1999. Uso e Manejo de lodo de Esgoto na Agricultura.

PROSAB (2003). *Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte*. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003. Projeto PROSAB.

RESOLUÇÃO 03/2006, do Conselho do Meio Ambiente do Distrito Federal (CONAMA).

RICHTER, C.A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

ROCCA, A. C. C., et al. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2. ed. Rev. Ampla. São Paulo: CETE'SB, p.135-184, 1993.